

## Ультразвуковое зондирование плазмоида

© С.И. Степанов

Санкт-Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова,  
188300 Гатчина, Ленинградская область, Россия  
e-mail: stepanovsmai@mail.ru

(Поступило в Редакцию 4 декабря 2012 г. В окончательной редакции 18 марта 2013 г.)

Атмосферный плазмоид, полученный в разряде над поверхностью воды, известен с 2000 г. и исследуется в нескольких лабораториях. Для понимания природы плазмоида необходимо научиться измерять его основные параметры, в частности газовую температуру. Измерения температуры осложнены тем, что плазмоид поднимается в воздухе и недолго находится в поле зрения датчиков. Развита методика зондирования плазмоида с помощью ультразвука. Приведена схема установки для ультразвукового зондирования и дано описание методики. Скорость звука в газе однозначно связана с его температурой. В предположении, что плазмоид формируется из водяного пара, по скорости ультразвука вычислена температура плазмоида. Полученные экспериментальные результаты показали, что температура плазмоида уменьшается от 2800 до 600–700 К в течение его времени жизни, 500 мс. Уменьшение температуры происходит вследствие теплоотдачи и смешивания с окружающим воздухом.

### Введение

Плазмоид, образующийся в разряде над сосудом с водой [1–9], является малоисследованным видом плазмы. В автономной фазе плазмоид живет 300–500 мс за счет запасенной энергии. Энергия может находиться в возбужденных атомах, ионизованных частицах. Но время жизни таких состояний на несколько порядков меньше времени жизни плазмоида. Энергия также может находиться в химической форме, эта версия лучше согласуется с длительным временем жизни [3,4]. По этой версии электрическая энергия конденсатора превращается частично в химическую энергию, а последняя — в энергию излучения. Примечательная особенность этих превращений состоит в том, что эффективность перехода электрической энергии разряда в химическую довольно большая [там же].

Плазмоид имеет резкую границу с воздухом. Она видна на высококачественных фотографиях [3,10]. Граница проявляет себя также в зондовых исследованиях по резкому изменению электрических свойств [5,6]. В плазмоиде обнаруживается электрический заряд, соответствующий потенциалу плазмоида около 1 кВ. Причем заряд обнаруживается в тех опытах, в которых высокое напряжение прикладывают к центральному электроду [5,6], и отсутствует, если центральный электрод заземлен [3,4].

Плазмоиды, получаемые в разных лабораториях, имеют отчасти разные свойства. Различия возникают из-за разного материала центрального электрода, из-за разного состава воды и различной схемы заземления. Таким образом, в настоящее время плазмоид не является стандартным, воспроизводимым объектом физики плазмы. Желательно наряду с уникальными (для данной лаборатории) объектами получать и „стандартный“ плазмоид. При исследовании стандартного плазмоида в разных лабораториях должны быть получены одинаковые его параметры.

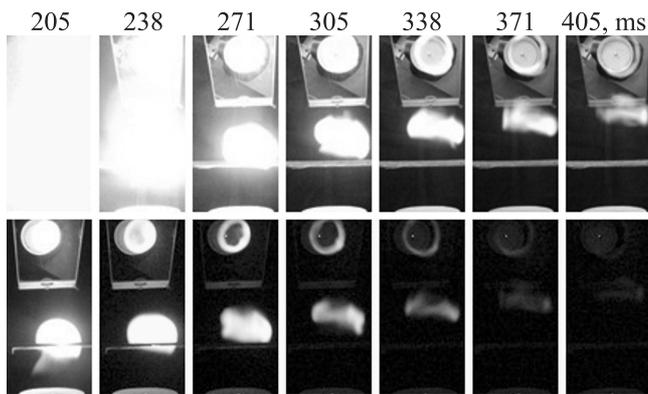
Для исследования природы плазмоида необходимо знать его основные параметры, в частности газовую температуру. Измерения температуры осложняются небольшим временем жизни объекта и тем, что он довольно быстро поднимается, со скоростью около 1 м/с и, следовательно, недолго находится в поле зрения измерительного прибора. Первоначально температура оценивалась по скорости всплывания плазмоида; в этом способе температура определяет его плотность и, следовательно, выталкивающую силу [7]. Этот метод не дал надежных результатов из-за отсутствия модели обтекания. Прямые измерения газовой температуры на средних стадиях существования плазмоида были проведены термопарой с малой постоянной времени [3,4]. На ранних стадиях автономного плазмоида термопара не выдерживала нагрева. Газовая температура оценивалась также по степени отклонения луча лазера, но на стадии электрического разряда [там же]. На средних и поздних стадиях жизни автономного плазмоида этот метод оказался недостаточно чувствительным. В тех же работах оценивалась температура электронов на стадии разряда по уширению спектральных линий.

В настоящей работе проведено ультразвуковое зондирование плазмоида на всех стадиях его автономного существования. По скорости ультразвука оценена его газовая температура.

### 1. Экспериментальная установка и плазмоид

Одна из целей представленной работы — „стандартизация“ плазмоида для улучшения статистики измерений (стабилизация времени его жизни, формы, траектории движения). Этой цели служат некоторые изменения в экспериментальной установке.

Установка для получения плазмоида в целом соответствует описаниям, приведенным в [1,2,5]. Центральный



**Рис. 1.** Кадры видеосъемки плазмоида в автономной фазе. Время указано в миллисекундах с начала разряда. Верхний ряд — камера без фильтра, нижний ряд — с серым фильтром. Разряд окончился при 140 ms.

электрод диаметром 8 mm состоит из графита. Он окружен кварцевой трубкой с наружным диаметром 10 mm. Трубка возвышается на 3 mm над водой. Электрод опущен в трубке на 3 mm. Непосредственно перед разрядом на электрод помещали примерно 2–3  $\mu\text{l}$  водопроводной воды; это делали, смачивая его кисточкой.

Батарея конденсаторов имела емкость 700  $\mu\text{F}$ . Ее заряжали до напряжения 5 kV. Длительность разряда составляла 140 ms.

Поскольку свойства плазмоида зависят от длительности разряда, был разработан механический выключатель, стабилизирующий время разряда и позволяющий его контролируемо изменять. Для увеличения быстродействия выключателя и уменьшения его габаритов применили стандартную конструкцию, в которой дуга при размыкании втягивается магнитным полем в зазор между керамическими пластинами [8,9]. Другое улучшение установки состояло в том, что высоковольтные провода к банке с водой подводили снизу, что обеспечивало осевую симметрию электрического поля над банкой, и это, в свою очередь, делало вертикальную траекторию объекта лучше воспроизводимой.

Измерение тока разряда и напряжения на электродах было сделано как описано в [1,2,5]. Данные подавали на измерительную плату L1250A фирмы L-CARD, на ту же плату подавали принятый ультразвуковой сигнал.

Видеосъемка осуществлялась двумя цифровыми фотокамерами „CANON IXUS 95 IS“ в режиме „видео“. На объектив одной камеры помещали 30 кратный серый фильтр; эта камера позволяла разглядеть ранние, яркие стадии явления. Поздние стадии лучше получались на камере без фильтра. Для получения вида сверху над банкой с водой под углом 45° к вертикали было установлено зеркало.

Плазмоид по внешнему виду не отличался от плазмодов, исследованных в других лабораториях. После включения тока над поверхностью воды появляется плазменный „паучок“. Затем из него образуется плазменная струя с округлой верхней частью. Она увеличивается в

диаметре, а ножка струи утоньшается. После прекращения тока разряда ножка тут же исчезает. Плазмоид в этот момент выглядит как шарообразный, с резкой верхней границей и размытой нижней. Такая форма сохраняется 2 кадра, т. е. около 60 ms. При изучении этой стадии выяснено [3,10], что плазмоид имеет более яркое ядро, которое поднимается быстрее самого плазмоида. Затем объект превращается в тор, это особенно хорошо видно при съемке сверху, сделанной через зеркало (рис. 1). Такая форма сохраняется до затухания объекта. Тор, по-видимому, представляет собой вихревое кольцо; при вращении он захватывает окружающий холодный воздух, поступающий снизу [3,4]. На изображениях видно, что тор вытянут по вертикали.

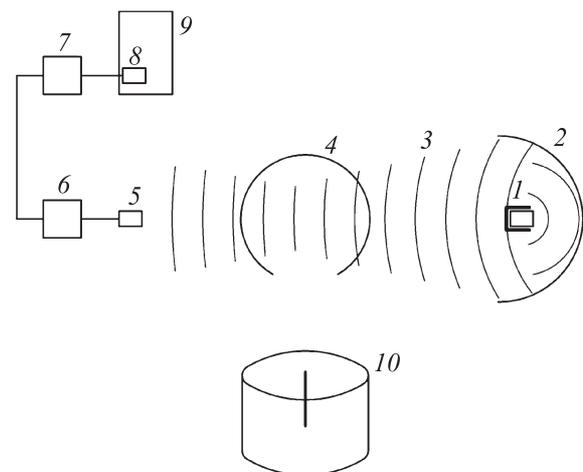
## 2. Ультразвуковое зондирование плазмоида

Связь между скоростью звука и температурой газа дается формулой:

$$c = \sqrt{\gamma RT/M}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость звука,  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $R$  — универсальная газовая константа,  $T$  — абсолютная температура,  $M$  — молярная масса газа. Эта связь табулирована для газов и для слабо ионизованных газов, в частности для воздуха и водяного пара [11]. Таким образом, если измерить скорость звука в плазмоиде, то в принципе можно определить его температуру при условии, что химический состав плазмоида известен.

Ультразвуковое зондирование осуществляли импульсно-фазовым методом, схема установки приведена на рис. 2. Использовали пьезоизлучатель M40S и приемник M40R фирмы Murata, оба на частоту 40 kHz. Для этой



**Рис. 2.** Схема ультразвукового зондирования плазмоида. 1 — ультразвуковой излучатель, 2 — рефлектор, 3 — ультразвуковая волна, 4 — плазмоид, 5 — ультразвуковой приемник, 6 — усилитель, 7 — фильтр, 8 — измерительная плата, 9 — компьютер, 10 — сосуд с водой, над которым происходит разряд.

частоты длина волны в воздухе комнатной температуры равна 8,5 мм. Так как излучатель имеет довольно широкое распределение интенсивности звука по углу (около  $100^\circ$ ), то желательна применение концентратора. Рефлектор дал лучшие результаты, чем рупор. Излучатель создает звуковую волну с заметными боковыми и задними лепестками. В случае применения рефлектора эти паразитные лепестки излучают прямо в сторону плазмоида; их излучение опережает основной импульс и, следовательно, может искажать его форму. Поэтому излучатель помещен в свинцовый экран, сильно поглощающий звук. Рефлектор делает угловое распределение волны более узким, при этом волна фокусируется в область диаметром 4–5 см. Это приемлемо, поскольку в несколько раз меньше диаметра плазмоида, 13–21 см. Излучатель, рефлектор, приемник и усилитель закреплены на раме, высоту которой над сосудом можно менять.

С периодичностью 5,6 мс на излучатель подавали прямоугольные импульсы напряжением 12 В, длительность их составляла 2 периода резонансной частоты излучателя, т.е.  $50 \mu\text{s}$ . На выходе приемника регистрируется импульс существенно более длинный (рис. 3). Такое увеличение длительности типично для ультразвуковых приборов общего применения частотой 40 кГц [12]. Причина уширения состоит, в частности, в том, что эти ультразвуковые приборы довольно узкополосные. Определение времени прихода такого импульса было бы затруднительно. В работе [13] показано, что применение режекторного фильтра, подавляющего резонансную частоту, укорачивает принятый импульс. Здесь был применен фильтр с аналогичными характеристиками, только не цифровой, а собранный из электронных компонентов — конденсатора, индуктивности и резистора (поз. 7 на рис. 2). Для еще большего укорочения импульса применен также  $L, R$ -фильтр, в электрическом тракте расположенный перед излучателем [14]. С применением этих фильтров импульс становится значительно короче (рис. 4). Пользуясь тем, что первые три периода имеют характерный рисунок, время прихода импульса можно определить с точностью до доли периода.

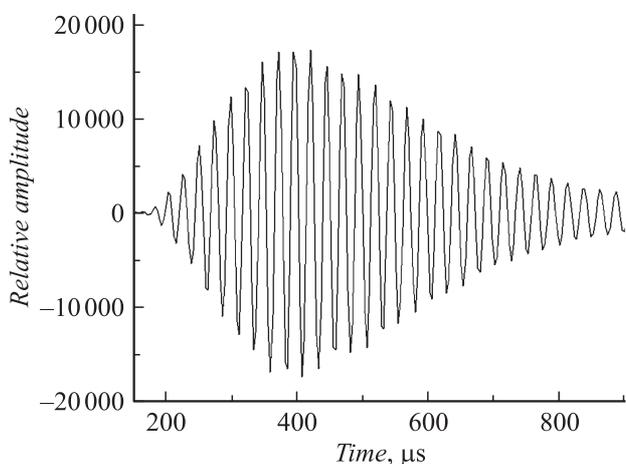


Рис. 3. Принятый ультразвуковой импульс в тракте без фильтров.

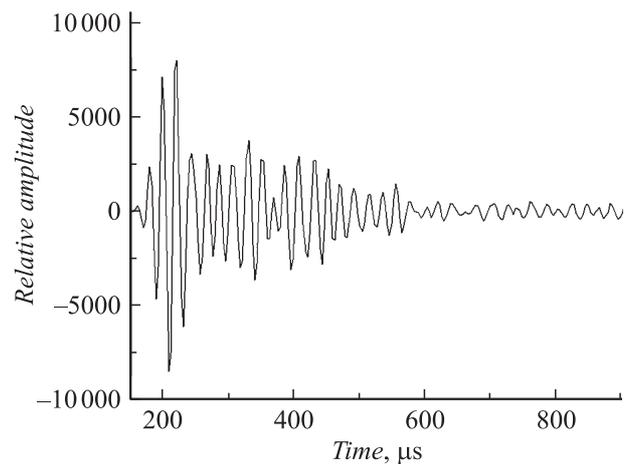


Рис. 4. Принятый импульс, когда в приемной части тракта применен режекторный фильтр, а в передающей части —  $L, R$ -фильтр.

Для вычислений следовало бы учитывать профиль температуры в плазмоиде вдоль звукового луча. Поскольку он неизвестен, в первом приближении температуру считали постоянной. Тогда для вычисления скорости звука в плазмоиде напишем очевидные соотношения

$$V_0 = D/t_0, \quad V_P = D/t_P,$$

где  $V_0$  и  $V_P$  — скорость звука при комнатной температуре и при температуре плазмоида соответственно,  $D$  — диаметр плазмоида,  $t_0$  и  $t_P$  — время прохождения расстояния  $D$  при комнатной температуре и при температуре плазмоида соответственно. Комбинируя эти формулы, получаем, что скорость звука в плазмоиде

$$V_P = (1/V_0 - \Delta t/D)^{-1}, \quad (2)$$

где обозначено  $\Delta t = t_0 - t_P$ . Для вычислений по формуле (2) разницу времен  $\Delta t$  получали по ультразвуковым данным, а диаметр плазмоида  $D$  определяли по видеосъемкам.

### 3. Проверка метода ультразвукового зондирования

Для проверки метода был сделан фен, дающий вертикальный поток теплого воздуха диаметром 12 см, что близко к диаметру плазмоида. Температура в центре потока была 450 К. Измерения состояли в том, что поток воздуха пересекал ультразвуковой луч в течение времени 0,1–0,2 с. Для этого ультразвуковая установка, установленная на раме, перемещалась горизонтально, поперек потока воздуха, в то время как фен оставался неподвижен. Таким образом, максимально имитировали измерения с плазмоидом. Ультразвуковые данные давали разность времени. Для вычисления скорости звука необходимо еще знать диаметр потока теплого

воздуха. Для его измерения поток воздуха над феном сканировали термопарой по двум координатам, получая профиль температуры. Из него определяли диаметр потока. Температура, оцененная по формулам (2) и (1), неплохо совпадала с данными термопары.

Для улучшения точности расчетов использовали не диаметр потока, а профиль потока, полученный в термопарных измерениях. Профиль был нормирован на произвольное значение, так что данные по температуре терялись. В этом более точном методе температура, полученная из ультразвуковых измерений, совпадала с измеренной термопарой с точностью 5%.

#### 4. Экспериментальные результаты

На рис. 5 показано, как меняется амплитуда принятого ультразвука в эксперименте. Для интерпретации графика надо заметить, что скорость звука в газовой среде плазмоида больше, чем в окружающем воздухе. Поэтому плазмоид действует как рассеивающая линза на звуковой луч. В тот момент, когда плазмоид верхним краем касается луча (примерно 220 ms на рис. 5), луч отклоняется вверх и интенсивность принятого сигнала падает. При дальнейшем подъеме плазмоида луч пересекает его центр. В это время плазмоид рассеивает луч, а сигнал несколько возрастает. Этому соответствует „горка“ на рис. 5 между 300 и 350 ms. Далее сигнал снова уменьшается, поскольку луч отклоняется вниз. Наконец амплитуда возвращается к исходному значению (после 400 ms). Электрический разряд начинается на 50 ms (виден выброс, это наводка от начала разряда) и заканчивается в момент 190 ms, что контролируется регистрацией тока и напряжения разряда.

Наименьшее время прихода импульсов (т.е. наибольшая скорость звука) наблюдалось на горке (рис. 5). Для обработки брали 3 или 4 последовательно принятых импульса с минимальными временами прихода. Для вычислений скорости звука по формуле (2) брали среднее

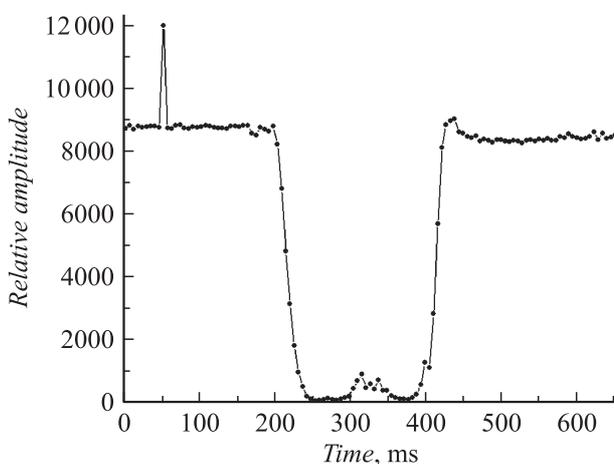


Рис. 5. Интенсивность принятого ультразвукового сигнала по времени.

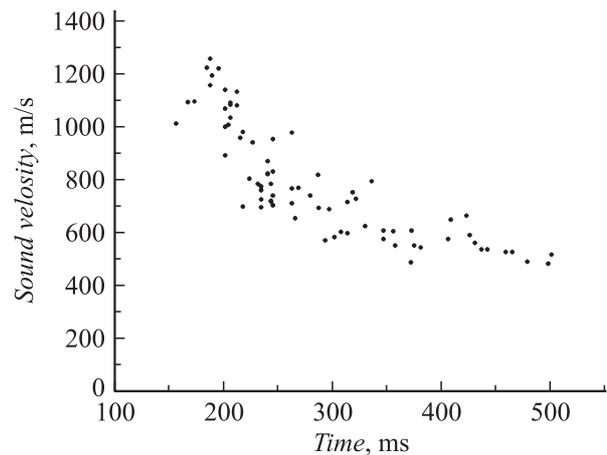


Рис. 6. Изменение скорости ультразвука, проходящего через плазмоид, в зависимости от времени, прошедшего с начала разряда.

значение времени по этим импульсам. Экспериментальные результаты измерения скорости звука приведены на рис. 6.

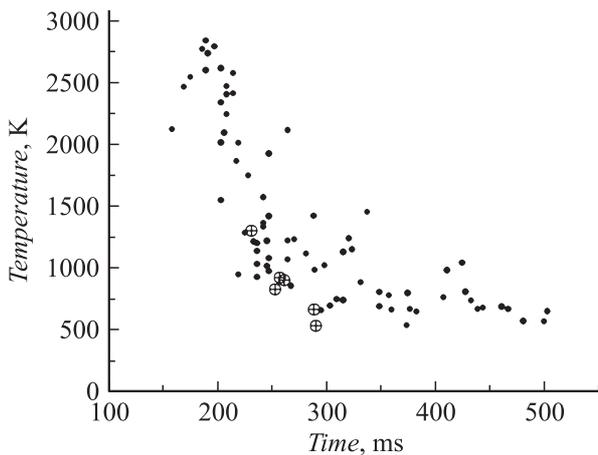
Далее, для получения температуры из скорости звука по формуле (1) следует определить состав плазмоида. Прямое определение состава плазмоида представляет собой трудную задачу и до сих пор не осуществлено. В работах [3,7] сделано предположение, что плазмоид в момент прекращения тока состоит из водяных паров. Основания к этому были указаны следующие:

1) плазмоид формируется из плазменного „паучка“, который находится над поверхностью воды.

2) количество воды, испаряемое при выстреле, примерно совпадает с количеством газа в плазмоиде в момент его образования. Это было показано следующим образом. Первую величину определяли взвешиванием банки до и после выстрелов и получили  $\approx 70$  mg или 3.9 mM воды. Количество газа определяли из газового закона, зная температуру, объем и давление плазмоида.

Теперь необходимо оценить состав газа в конце аппаратной регистрации (в момент 500 ms). Для этого снова используем газовый закон. Оценим изменение параметров плазмоида в интервале 140–500 ms. Из видеосъемок видно, что объем плазмоида увеличивается в  $\approx 2$  раза. Оценим изменение температуры. Из рис. 6 видно, что скорость звука в момент 140 ms составляет  $\approx 1400$  m/s, а в момент 500 ms скорость составляет  $\approx 500$  m/s. По этим данным вычисляем обе температуры, причем для первой точки берем чистый пар (как это обосновано выше), а для второй — произвольный состав, например 50% пара. Получаем температуры 3000 и 525 K соответственно. Их отношение составляет 5.7. Следовательно, количество газа в плазмоиде за время с 140 до 500 ms увеличилось в  $2 \times 5.7 = 11.4$  раза. Во столько раз водяной пар был разбавлен воздухом. Следовательно, соотношение пар:воздух для 500 ms равно 1:10.4.

С целью уточнения этот расчет можно сделать еще раз, взяв за основу уже полученную пропорцию. Вновь



**Рис. 7.** Изменение температуры плазмоида в зависимости от времени, прошедшего с начала разряда. Точки — настоящая работа, кружки с крестом — данные из работ [3,4].

полученная пропорция, однако, мало повлияет на температуру, поскольку плазмоид в основном состоит из воздуха. Типичная скорость звука в конце регистрации составляет 500 м/с. Для этой скорости и для пропорции 1:10 вычисленная температура составит 614 К, а для пропорции 1:20 она составит 622 К.

Полученная пропорция пар–воздух используется в вычислениях температуры в конкретных опытах. В этих вычислениях считаем, что отношение пар–воздух меняется линейно во времени и одинаково для всех объектов. На рис. 7 приведены результаты расчета. Как видно, температура уменьшается с 2800 до 600–700 К.

Вышеприведенные оценки говорят о том, что состав газа плазмоида не столь критичен для определения температуры, как может показаться. Действительно, даже если на начальной стадии автономного плазмоида считать его состав целиком воздушным, то значение вычисленной температуры возрастет лишь на 37% и составит 3700 К. Опять оценка температуры на конечной стадии почти не изменится, так как тогда плазмоид состоит почти полностью из воздуха.

## 5. Ошибки измерений

На видеосъемках видно, что плазмоид неоднороден. Разные участки звукового луча проходят через места с разными температурами. На входе приемника такие лучи складываются со своими фазами и амплитудами, давая результирующий сигнал. Форма сигнала искажается, длительность сигнала увеличивается. Иногда становится невозможно определить время прихода сигнала. В большей части опытов имеется 3–4, иногда до 6 принятых импульса в районе горки, по которым можно определить время прихода сигнала. В пяти опытах не было ни одного подходящего импульса; эти опыты не обрабатывали. Остальные 75% опытов без дополнительной селекции представлены на графиках. В частности в обработку

включены объекты, которые отклонялись от звукового луча на 5–6 см.

Ошибка измерения скорости звука складывается в равной степени из ошибки в определении времени и диаметра плазмоида. Время определяется с точностью до одного интервала оцифровки, т. е.  $2 \mu\text{s}$ . При типичной разнице времен  $200 \mu\text{s}$  ошибка составит всего 1%. Из-за искажения формы принятого сигнала возможна ошибка в определении правильного периода синусоиды. В этом случае ошибка составит период, т. е.  $25 \mu\text{s}$ , и относительная ошибка составит  $25/200 = 12\%$ . Определение диаметра имеет ошибку около 8%. Суммарная ошибка в определении скорости звука составит 15%.

Разброс точек на рис. 6 лежит в основном в пределах этой величины. Однако имеется некоторое количество точек, у которых скорость звука заметно больше средней скорости для данного времени. Вероятно, причина этого состоит в индивидуальных свойствах плазмоидов. В частности, наблюдалась корреляция между формой плазмоида и скоростью звука. Иногда плазмоид выглядит как тор с более яркой, долгоживущей областью. Если эта область находится на пути звукового луча, то измерения давали несколько большую скорость, чем средняя.

Что касается температуры, то здесь добавляется еще систематическая ошибка в определении химического состава. Как отмечалось, для начальной температуры фактически следует указать диапазон 2800–3700 К.

На рис. 7 нанесены для сравнения также данные по измерению температуры термопарой из работ [3,4] и они систематически меньше, чем полученные в данных экспериментах. При сравнении этих двух измерений надо учесть два обстоятельства. Первое — плазмоиды несколько отличаются. Здесь использовали угольный электрод, в работах [3,4] — металлический. В наших опытах 2000-х годов исследовался в основном плазмоид из угольного электрода (около 1300 опытов, данные опубликованы частично). И около сотни опытов сделаны с металлическими электродами. Плазмоиды, возникающие над металлическим электродом, имели в десятки раз более высокую светимость в фазе протекания тока и более быстрое уменьшение светимости в дальнейшем в автономной фазе. Второе обстоятельство относится к области, где измеряется температура. Термопара измеряет локальную температуру в центре плазмоида, а именно сюда поступает холодный воздух в процессе вихревой конвекции. Следовательно, температура термопары заведомо меньше, чем средняя температура объекта, измеряемая данным методом.

## Заключение

Установка для получения плазмоида усовершенствована с целью „стандартизации“ получаемых плазмоидов. Получение воспроизводимых объектов позволило существенно улучшить статистику. Для оценки газовой температуры плазменного объекта применен метод

ультразвукового зондирования. Полученные результаты показывают, что температура уменьшается с 2800 до 600–700 К в течение времени жизни объекта. Уменьшение температуры плазмоида происходит за счет остывания и за счет регулярного конвективного смешивания его с окружающим воздухом. Преимущество метода состоит в том, что он без изменений может быть использован от момента прекращения тока (а возможно, и ранее) до момента прекращения видимости плазмоида, т. е. в течение всего его времени жизни.

Автор благодарит А.В. Арутюняна за участие в экспериментах, обсуждение работы на всех ее этапах, А.И. Егорова за интерес к работе, рекомендации по получению плазмоида, обсуждение результатов; Д.И. Мордасова, А.С. Степанова, А.П. Роганова и Е.И. Завадского за участие в создании установки и предоставление аппаратуры. Автор бесконечно благодарен Емелину С.Е., предложившего принципиальную схему метода зондирования и оказавшему всестороннюю помощь в создании установки, а также за неоднократные консультации и обсуждение результатов.

## Список литературы

- [1] *Егоров А.И., Степанов С.И.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 12. С. 102–104.
- [2] *Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д.* // УФН. 2004. Т. 174. № 1. С. 107–109.
- [3] *Versteegh A.* // Analysis of a Long Living Atmospheric Plasmoid. Master's thesis, Technical University Eindhoven, 2007.
- [4] *Noack S.* // Analysis of Long Living Plasmoids. Diploma thesis. Leipzig, Universitat Leipzig, 2008.
- [5] *Егоров А.И., Степанов С.И.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 6. С. 15–19.
- [6] [http://biod.pnpi.spb.ru/pages\\_ru/Stepanov/index.html](http://biod.pnpi.spb.ru/pages_ru/Stepanov/index.html)
- [7] *Wenze Uwe* // Plasma and Fusion Research: Letters. 2009. Vol. 4. P. 046–1.
- [8] *Кужиков Г.А.* Проектирование выключателей переменного тока высокого напряжения. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 295 с.
- [9] *Залесский А.М.* Электрическая дуга отключения. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. 266 с.
- [10] *Emelin S.E., Astafiev A.M., Pirozerski A.L.* // Proc. ISBL-08, 2008. Kaliningrad, Russia. P. 42.  
Preprint: <http://arxiv.org/abs/0804.0981>.
- [11] *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
- [12] *Sandoz J.-P.* // 2006 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2006. Vancouver, Canada. P. 1801.
- [13] *Бархатов В.А.* // Дефектоскопия. 2009. № 6. С. 76–82.
- [14] *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 2. С. 284–288.